

25X1

Page Denied

Next 1 Page(s) In Document Denied

Acad. g. S. ...

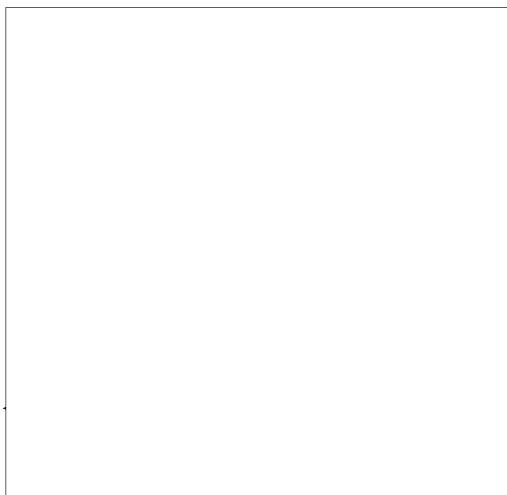
ДОКЛАДЫ

АКАДЕМИИ НАУК СССР

March 20

1958

Том 121, № 4



STAT

Доклады Академии наук СССР
1958. Том 121, № 4

ФИЗИКА

В. М. ФРИДКИН
ТЕОРИЯ ОБРАЗОВАНИЯ
СКРЫТОГО ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ
И ЗАКОН ВЗАИМОЗАМЕСТИМОСТИ

(Представлено академиком А. В. Шубниковым 25 III 1958)

Кинетика процессов образования фотоэлектретного состояния в монокристаллах и деполяризации фотоэлектретов при освещении может быть исследована на основе представлений зонной теории кристаллов ⁽¹⁾. В свою очередь, указанные процессы лежат в основе электрофотографии на фотоэлектретах ^(2,3) и с их учетом может быть построена общая теория образования скрытого электрофотографического изображения, распространяющаяся и на такие процессы, как классическая ксерография и классическая электрофотография. В основе такого исследования лежит решение системы дифференциальных уравнений, описывающих электронные переходы в зонной модели, соответствующей схеме энергетических уровней электронов определенного кристалла. В основу нашего расчета положена схема энергетических уровней электронов в монокристалле серы, предложенная П. С. Тартаковским и Г. Рекаловой ⁽⁴⁾.

Пусть d_1 — число электронов, переходящих под действием света в единице объема и за единицу времени из нормальной зоны в зону проводимости; kN — число электронов, переходящих под действием света в зону проводимости с заполненных уровней прилипания, причем $d_1 = s_1 E$ и $k = s_2 E$. Здесь E — интенсивность света (освещенность); s_1 и s_2 — коэффициенты, зависящие от поглощения света и квантового выхода.

Кинетические уравнения, описывающие процесс заполнения уровней прилипания электронами и соответствующие схеме, приведенной на рис. 1, имеют следующий вид:

$$dn/dt = d_1 + kN - \alpha nP - \beta (M - N) n; \quad (1)$$

$$dN/dt = -kN + \beta (M - N) n + Q; \quad (2)$$

$$dP/dt = d_1 + Q - \alpha nP; \quad (3)$$

$$P = N + n, \quad (4)$$

где M — концентрация уровней прилипания; N — концентрация электронов на уровнях прилипания; n — концентрация электронов в зоне проводимости; P — концентрация дырок в нормальной зоне; Q — число электронов, переходящих в единице объема и за единицу времени под действием теплового движения из нормальной зоны на уровни прилипания; α и β — коэффициенты рекомбинации, смысл которых понятен из схемы, представленной на рис. 1.

Задача сводится к определению зависимости N от времени, так как концентрацию электронов на уровнях прилипания следует считать пропорциональной заряду фотоэлектрета. При этом не принимается во внимание ориентирующее действие поляризующего поля.

Система уравнений (1), (2), (3) в предположении $d_1 = Q = 0$ была подробно изучена Э. И. Адировичем применительно к задаче исследования эле-

ментарного закона затухания люминесценции идеальных кристаллофосфоров⁽⁵⁾. При этом величина P имела непосредственный физический смысл заключенной в кристаллофосфоре светосуммы, а интенсивность люминесцентного послесвечения была пропорциональна dP/dt .

Э. И. Адировичем было, в частности, предложено решение системы уравнений (1), (2), (3) в предположении $d_1 = Q = 0$ в квазистационарном приближении, которое определялось условиями $n \ll N$ и $dn/dt \ll dN/dt$.

В той же работе⁽⁵⁾ было показано, что для квазистационарного решения отношение эффективных сечений захвата $\gamma = \beta/\alpha$ является единственным параметром, определяющим вид элементарного закона затухания.

Можно показать, что квазистационарное решение системы уравнений (1), (2), (3) ($n \ll N$, $dn/dt \ll dN/dt$) удовлетворительно описывает кинетику образования фотоэлектрического состояния в монокристалле и может быть положено в основу теории образования скрытого электрофотографического изображения. Ниже будет показано, что необходимым и достаточным условием справедливости квазистационарного решения системы уравнений

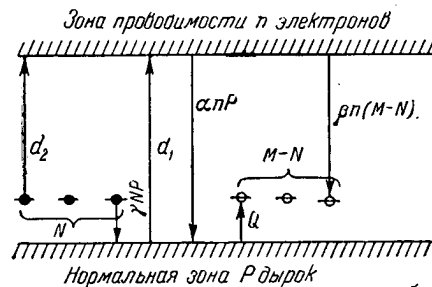


Рис. 1. Энергетическая зонная диаграмма для монокристалла серы

(1), (2), (3) является выполнение закона взаимозаместимости, который применительно к электрофотографическому процессу приобретает непосредственный физический смысл. Вопрос об аналогии между темновой деполяризацией фотоэлектрического состояния, определяющей регрессию скрытого электрофотографического изображения, и люминесцентным послесвечением кристаллофосфоров в настоящей работе не рассматривается.

Закон взаимозаместимости для процесса образования фотоэлектрического состояния в монокристаллах может быть сформулирован следующим образом. Величина поляризации или величина поверхностной плотности зарядов фотоэлектрического состояния, пропорциональная плотности электронов на уровнях прилипания N , зависит только от произведения Et интенсивности света E , используемого при поляризации, на время поляризации t . Как будет показано ниже, закону взаимозаместимости, подтверждающемуся экспериментально, может быть дана наглядная физическая интерпретация.

Пусть выполнен закон взаимозаместимости. Согласно данному выше определению это означает, что $N = N(z)$, где $z = Et$. Подставляя $N = N(z)$ в уравнение (2):

$$E \frac{dN}{dz} = -s_2 E N(z) + \beta [M - N(z)] n + Q. \quad (5)$$

В выражении (5) Q по определению не зависит от E . Из (5) следует, что если выполнен закон взаимозаместимости, то $Q = 0$ и $n = n_0(z)E$. Следовательно, для выполнения закона взаимозаместимости необходимо и достаточно, чтобы, с одной стороны, можно было пренебречь эффектом перехода электронов под действием тепловой энергии из нормальной зоны на уровни прилипания и, с другой стороны, для плотности электронов проводимости выполнялось соотношение:

$$n = n_0(z)E. \quad (6)$$

Соотношение (6) подставляем в уравнение (1):

$$E^2 \frac{dn_0(z)}{dz} = s_1 E + s_2 E N(z) - \alpha n_0(z) E N(z) - \alpha n_0^2(z) E^2 - \beta [M - N(z)] E n_0(z). \quad (7)$$

Из (7) видно, что закон взаимозаместимости может выполняться лишь в том случае, когда можно пренебречь членами, содержащими E^2 , откуда следует, что выполняются, по крайней мере, два условия:

$$E^2 \frac{dn_0}{dz} \ll s_2 E N(z) - \beta [M - N(z)] E n_0, \quad \alpha n_0^2 E^2 \ll \alpha n_0 E N(z). \quad (8)$$

Но при выполнении условий (8) одновременно всегда выполнены условия квазистационарного приближения: $n \ll N$, $dn/dt \ll dN/dt$.

Покажем, что наличие малой квазистационарной концентрации электронов проводимости, т. е. выполнение условий $n \ll N$, $dn/dt \ll dN/dt$, является достаточным условием для выполнения закона взаимозаместимости. Из неравенства $dn/dt \ll dN/dt$ и соотношения (4) следует, что $dP/dt \approx dN/dt$. Пользуясь последним соотношением и приравнявая друг другу правые части уравнений (2) и (3), получаем в предположении $Q = 0$:

$$n = \frac{d_1 + kN}{\alpha [P + \gamma(M - N)]}, \quad \text{где } \gamma = \frac{\beta}{\alpha}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (2) и принимая во внимание, что из условий квазистационарного приближения $P \approx N$, получаем

$$\frac{1}{E} \frac{dN}{dt} = \frac{dN}{dz} = -s_2 N + \gamma(M - N) \frac{s_1 + s_2 N}{N + \gamma(M - N)}. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) может быть представлено в виде $N = N(z)$, что по определению и означает выполнение закона взаимозаместимости.

Полученные результаты приводят к выводу о том, что всякое квазистационарное решение системы уравнений (1), (2), (3) удовлетворяет закону взаимозаместимости и, наоборот, всякое решение системы уравнений (1), (2), (3), удовлетворяющее закону взаимозаместимости, является квазистационарным.

С другой стороны, процесс образования фотоэлектретного состояния в монокристалле, как и процесс деполяризации фотоэлектрета при освещении, лежит в основе образования скрытого электрофотографического изображения на фотоэлектретах (^{2,3}).

При проектировании на поверхность соответствующего диэлектрика какого-либо позитивного изображения и одновременной поляризации диэлектрика в нем создается скрытое электрофотографическое изображение, обусловленное неравномерным распределением поляризации. При проявлении одним из известных способов (³) скрытого электрофотографического изображения мы получаем в этом случае негативное изображение, соответствующее позитивному оригиналу. Таким образом, процесс создания фотоэлектретного состояния в монокристалле или процесс поляризации соответствует электрофотографической схеме позитив — негатив. Легко видеть, что процесс деполяризации фотоэлектрета при его освещении, также лежащий в основе образования скрытого электрофотографического изображения, соответствует электрофотографической схеме позитив — позитив.

С этой точки зрения закон взаимозаместимости следует понимать как зависимость оптической плотности проявленного электрофотографического изображения только от произведения Et интенсивности освещения E и времени экспозиции t . Тем самым закон взаимозаместимости приобретает конкретный физический смысл и дает возможность провести по крайней мере внешнюю аналогию между процессом образования скрытого электрофотографического изображения и фотохимическими процессами в галоидах серебра. Анализ квазистационарного решения в общем виде представляется громоздким. Хорошее совпадение с экспериментом дает стационарное решение, которое получается в предположении $dn/dz = 0$ и которое можно рассматривать как частный случай квазистационарного приближения. Дифференцируя (9) и предполагая $dN/dt \neq 0$, имеем

$$d_1 = k\gamma M / (1 - \gamma). \quad (11)$$

Подставляя (11) в (9), получаем выражение для стационарной концентрации электронов проводимости

$$n = n_s = k / (1 - \gamma) \alpha. \quad (12)$$

Подставляя выражение (12) в уравнение (2), получаем уравнение

$$\frac{dN}{dt} + N \frac{k}{1-\gamma} - \frac{\gamma M k}{1-\gamma} = 0, \quad (13)$$

решение которого дает зависимость плотности электронов на уровнях прилипания N или заряда фотоэлектрета, пропорционального N , от времени поляризации:

$$N = N_s \left[1 - e^{-\frac{k}{1-\gamma} t} \right], \quad N_s = \gamma M. \quad (14)$$

Решение (14), которое можно назвать стационарным, получено в предположении

$$0 < \gamma < 1. \quad (15)$$

Произвольному значению γ отвечает квазистационарное решение, исследование которого представляет самостоятельную задачу.

Решение (14), в полном соответствии со сказанным выше, удовлетворяет закону взаимозаместимости, так как $k = s_2 E$. Из полученного решения (14) также видно, что при образовании фотоэлектрета имеет место эффект насыщения, причем соответствующая насыщению концентрация электронов на уровнях прилипания $N_s = \gamma M$.

Сопоставление (14) и (15) показывает, что эффект насыщения обусловлен заполнением электронами лишь части уровней прилипания, причем процент этого заполнения определяется только отношением соответствующих эффективных сечений захвата электрона.

Из условий, которым подчиняется полученное выше стационарное решение, в частности, следует, что $n_s \ll N_s$ или, принимая во внимание (12) и (14),

$$k/\beta M \ll 1, \quad (16)$$

что должно иметь место для любых освещенностей, так как $k = s_2 E$. Соотношение (16) можно рассматривать как необходимое условие применимости стационарного решения. Заметим, что это условие в виде неравенства (16) в точности совпадает с выражением, полученным ранее Э. И. Адировичем в качестве необходимого и достаточного условия применимости квазистационарного решения системы уравнений (1), (2), (3) в предположении $d_1 = Q = 0$ применительно к задаче исследования люминесцентного послесвечения идеальных кристаллофосфоров. В свете этого обстоятельства представляет интерес исследовать возможность одновременного наблюдения люминесцентного послесвечения и фотоэлектретного состояния в кристаллофосфорах, принимая во внимание, что темновая деполяризация фотоэлектрета может быть частично или полностью обусловлена безызлучательными электронными переходами.

Следует отметить, что ввиду условия нейтральности $P = N + n$ исходные уравнения (1), (2), (3) и полученное решение не содержат собственно электретного эффекта. Строгое решение должно учитывать поле и распределение электронов проводимости по координате.

Автор приносит глубокую благодарность акад. А. В. Шубникову и И. С. Желудеву за руководство работой и проф. Э. И. Адировичу за ряд ценных замечаний.

Институт кристаллографии
Академии наук СССР

Поступило
20 III 1958

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. М. Фридкин, Н. Т. Кашукеев, И. С. Желудев, ДАН, 117, № 5, 804 (1957). ² В. М. Фридкин, ДАН, 118, № 2, 273 (1958). ³ В. М. Фридкин, Кристаллография, 2, № 1, 130 (1957). ⁴ П. С. Тартаковский, Г. Рекалова, ЖЭТФ, 10, 1025 (1940). ⁵ Э. И. Адирович, Некоторые вопросы теории люминесценции кристаллов, 1957.